

ИЗМЕРЕНИЕ РАДОНА И ЕГО ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Разработана методика, позволяющая установить необходимое количество измерений радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) для заданной доверительной вероятности. С помощью радиометра РГА-09МШ, во взрывобезопасном исполнении, проведены исследования по установлению минимального количества измерений радона и его ДПР в шахтных условиях.

Ключевые слова: шахта, радон, нарушения, продукты распада, радиометр.

Согласно данным Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН) радон наряду со своими дочерними продуктами распада представляет опасность для здоровья человека. Подсчет вклада радона в формирование средней дозы облучения человека в процессе его жизни показывает, что общий вклад естественного облучения в дозовую нагрузку составляет около 72%. При этом вклад радона оценивается в 54% от естественного облучения. Более половины годовой дозы от всех природных источников излучения человек получает через воздух, облучая радоном дыхательные пути и легкие во время дыхания [1]. Среди источников естественной радиации наибольшую опасность для человека представляет радон – невидимый, не имеющий вкуса и запаха, химически инертный газ. Природный источник радона - урановые и ториевые руды, в процессе распада которых образуются изотопы – радон-222 и радон-220 (торон). Если опасность радонового облучения для шахтеров урановых шахт установлена однозначно, то для угольных шахт радоновая опасность является не изученной до конца проблемой. Поэтому измерения радона и его дочерних продуктов распада в условиях горных выработок для установления радоноопасности угольной шахты и дозы облучения горняков – актуальная задача.

В данной работе были проведены шахтные исследования, посвященные проблеме измерения радона и его дочерних продуктов распада в условиях горных выработок угольной шахты. Для проведения исследований был выбран радиометр РГА-09МШ во взрывозащищенном исполнении (РВ 1В Иа), с помощью которого можно производить измерения в угольной шахте, в том числе, опасной по газу [2].

Выбор оптимального объема измерений радиационных факторов (РФ): радона и его дочерних продуктов распада является одной из важнейших задач организации контроля радоноопасности. При решении этой задачи важно установить вариабельность измеряемой величины во времени и пространстве, ожидаемый вклад РФ в общую эффективную дозу Е, произвести выбор необходимой измерительной аппаратуры и метод измерения.

Выбор сети пунктов контроля и периодичность измерений в каждом пункте должны обеспечивать определение средних РФ с точностью, достаточной для объективной оценки индивидуальных экспозиций и доз

расчетным путем по данным о времени пребывания отдельных лиц в конкретных рабочих местах.

При расчете оптимального объема контроля необходимо учитывать [3]:

- уровни РФ по отношению к нормативам и их стабильность во времени;
- стабильность условий проветривания рабочих мест;

- особенности поступления радона и накопления его дочерних продуктов в отдельных горных выработках;

характер и степень локализации рабочих мест персонала.

В шахтных условиях сеть контрольных пунктов выбирают в соответствии с существующим характером и расположением индивидуальных рабочих мест, маршрутами передвижения персонала и схемой проветривания, а в дальнейшем периодически уточняют по мере изменения объема и характера работ на отдельных участках. В контролируемую зону включают все участки, где среднегодовые значения суммарного приведенного уровня РФ (СПУ РФ) превышают или могут превысить 0,05 допустимого уровня (или превышают 1 мЗв / год).

Выбранные пункты контроля должны характеризовать наиболее значимые по длительности пребывания и/или уровням РФ участки маршрутов перемещения и работы в шахте. Маршруты перемещения персонала шахты устанавливают по паспортам ведения горных работ, журналам нарядов, схемам маршрутов движения горных мастеров, рабочих и электрослесарей всех действующих участков и служб шахты, схемам доставки горняков к рабочим местам, а также по специальным отчетам лиц, не имеющих постоянных рабочих мест.

В данной работе исследования проводились на обособленном предприятии «Шахта «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь» в характерных точках (рабочих местах) по маршруту движения работников шахты к своим рабочим местам. Измерения радона и его дочерних продуктов распада проводились на посадочной площадке клетового ствола (рабочее место рукоятчика) и далее в околоствольном дворе (рабочее место стволового, камера ожидания руддвора гор.180 м), верхние посадочные площадки наклонных квершлагов, нижние посадочные площадки наклонных квершлагов, магистральные конвейерные и откаточные выработки, участковые выработки. Исследования проводились в зонах, характеризующихся различной концентрацией пыли (запыленностью).

На рабочем месте рукоятчика на шахте «Холодная Балка» были проведены исследования по установлению количества измерений (объема выборки) n , необходимого для оценки среднего уровня эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона, ЭРОА торона, активности радона-222 (C_{Rn}).

Число измерений n , необходимое для определения среднего уровня РФ (ЭРОА радона, ЭРОА торона, концентрации радона C_{Rn}), в некотором пункте контроля с относительной погрешностью δ можно оценить с помощью соотношения [3]:

$$n = \frac{1,2 \cdot t_{p,N} \cdot \sqrt{v}}{E_{cp}} \quad (1)$$

где $t_{p,N}$ – значение коэффициента Стьюдента для выбранного уровня доверительной вероятности P и количества измерений N ; (значение коэффициента Стьюдента вбиралось по таблицам [4]);

коэффициент 1,2 учитывает характерное для обычных условий логнормальное распределение значений измеряемых уровней РФ;

v – коэффициент вариации измеряемого радиационного фактора.

Если в течение некоторого времени в данном пункте выполнено N измерений уровня РФ и среднее арифметическое значение полученных значений E_i равно E_{cp} , то значение коэффициента вариации v равно [3]:

$$v = \frac{1}{E_{cp}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i (E_i - E_{cp})^2} \quad (2)$$

Измерения N уровней ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика проведены в различные дни в различное время различных смен при выполнении различных технологических операций. Концентрация пыли при этом изменялась от 5 до 15 мг/м³. Результаты измерения ЭРОА радона приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерения ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика шахты «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь»

N п/п	Дата замера	N фильтра	ЭРОА радона, (C _i), Бк/м ³	(c _i - \bar{c})	(c _i - \bar{c}) ²
1	17.07	69	7,174	6,675	44,55
2	13.07	59	11,73	2,119	4,490
3	13.07	60	13,85	0,001	0,000
4	13.07	61	18,91	5,061	25,613
5	13.07	62	13,38	0,469	0,219
6	13.07	63	15,25	1,401	1,963
7	12.07	54	16,69	2,841	8,071
8	12.07	56	18,45	4,601	21,17
9	12.07	57	11,96	1,889	3,568
10	12.07	58	15,26	1,411	1,991
11	06.07	33	9,690	4,159	17,30
Сумма			152,34		128,93
Среднее			13,849		

Значение коэффициента вариации измерений ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика для всего периода измерений, рассчитанное по формуле (2) равно:

$$n = \frac{1}{13,85} \sqrt{\frac{128,93}{10}} = 0,259;$$

коэффициент вариации измерений ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика для периода измерений за 13.07, рассчитанный по формуле (2) равен:

$$n = \frac{1}{14,62} \sqrt{\frac{29,28}{4}} = 0,185;$$

коэффициент вариации измерений ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика для периода измерений за 12.07, рассчитанный по формуле (2) равен:

$$n = \frac{1}{15,59} \sqrt{\frac{22,57}{3}} = 0,176;$$

Количество измерений, необходимое для определения уровня ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика, вычисленное с помощью формулы (1), при различных значениях доверительной вероятности Р приведены в табл. 2. Относительная погрешность принята равной $\delta=50\%$ в соответствии с ГОСТ [5,6]. Эти ГОСТы регламентируют предел основной допускаемой погрешности для измерения активности и объемной активности радионуклида в газах, а также активности радиоактивного аэрозоля равным не более 60%. Для радиометрических установок специального назначения и альфа-радиометров предел допускаемой относительной основной погрешности допускается устанавливать $\pm 50\%$.

Таблица 2 – Количество измерений **n** на рабочем месте рукоятчика, необходимое для оценки среднего уровня ЭРОА радона

Дата, количество замеров	Коэффициент вариации, v , отн.ед	Доверительная вероятность, P , отн.ед.	Коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$	Расчетное количество измерений, n_p	Принятое количество измерений, n
13.07 N=5	0,185	0,95	2,776	1,519	2
		0,9	2,1318	0,896	1
		0,8			1
12.07 N=4	0,176	0,95	3,182	1,805	2
		0,9	2,3534	0,988	1
		0,8			1
17.07 13.07 12.07 06.07 N=11	0,258	0,95	2,2281	1,940	2
		0,9	1,8125	1,270	2
		0,8	1,3720	0,73	1

Результаты измерения ЭРОА радона, приведенные в табл. 1, анализировались как выполненные в один день, так и за все дни суммарно. Например, обработка результатов за 13.07 показала, что достоверным для $P=0,95$ является количество измерений, равное двум замерам ($n=2$) на рабочем месте рукоятчика. Обобщенные за все дни результаты измерений также показали, что достоверным является количество измерений, равное двум.

Результаты измерений ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерения ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика шахты «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь».

N п/п	Дата замера	N фильтра	ЭРОА торона, (C_i), Бк/м ³	$(c_i - \bar{c})$	$(c_i - \bar{c})^2$
1	2	3	4	5	6
1	13.07	59	3,494	0,455	0,2070
2	13.07	61	1,457	1,582	2,5027
3	13.07	62	2,688	0,351	0,1232
4	13.07	63	3,295	0,256	0,0655
5	13.07	65	1,582	0,127	0,0161
6	14.07		1,604	1,457	2,1228
7	14.07	66	3,166	0,805	0,6480
8	14.07	67	3,844	1,648	2,7159
9	11.07	48	3,373	0,334	0,1115
10	11.07	47	2,875	0,164	0,0268
Сумма			30,39		8,5395
Среднее			3,039		

Значение коэффициента вариации измерений ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика для всего периода измерений, рассчитанное по формуле (2) равно:

$$n = \frac{1}{3,039} \sqrt{\frac{8,5395}{9}} = 0,304;$$

Количество измерений, необходимое для определения уровня ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика, вычисленное с помощью формулы (1), при различных значениях доверительной вероятности P приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Количество измерений n на рабочем месте рукоятчика, необходимое для оценки среднего уровня ЭРОА торона

Дата, количество замеров	Коэффициент вариации, v , отн.ед.	Доверительная вероятность, P , отн.ед.	Коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$	Расчетное количество измерений, n_p	Принятое количество измерений, n
13.07, 14.07, 11.07, N=10	0,304	0,95	2,2622	2,722	3
		0,9	1,8331	1,788	2
		0,8	1,3830	1,000	1

Для торона, необходимое количество замеров при доверительной вероятности $P=0,95$ оставило 3 измерения, что, вероятно, связано с весьма малыми значениями измеряемых величин.

Результаты измерений активности радона (C_{Rn}) на рабочем месте рукоятчика приведены в таблице 5.

Значение коэффициента вариации измерений активности радона на рабочем месте рукоятчика для всего периода измерений, рассчитанное по формуле (2) равно:

$$n = \frac{1}{24,76} \sqrt{\frac{148,23}{10}} = 0,155;$$

коэффициент вариации измерений активности радона на рабочем месте рукоятчика для периода измерений за 13.07, рассчитанный по формуле (2) равен:

$$n = \frac{1}{25,00} \sqrt{\frac{59,67}{4}} = 0,154;$$

коэффициент вариации измерений активности радона на рабочем месте рукоятчика для периода измерений за 12.07, рассчитанный по формуле (2) равен:

$$n = \frac{1}{24,85} \sqrt{\frac{85,59}{4}} = 0,186.$$

Количество измерений, необходимое для определения уровня активности радона на рабочем месте рукоятчика, вычисленное с помощью формулы (1), при различных значениях доверительной вероятности P приведены в табл. 6.

Таблица 5 – Результаты измерения активности радона (C_{Rn}) на рабочем месте рукоятчика шахты «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь».

N п/п	Дата замера	N филь- тра	C_{Rn} , (C_i), Бк/м ³	Измерения в отдельные дни (13.07 и 12.07)		Измерения за все дни (12-17.07)	
				$(c_i - \bar{c})$	$(c_i - \bar{c})^2$	$(c_i - \bar{c})$	$(c_i - \bar{c})^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	17.07	69	23,11			1,655	2,722
2	13.07	59	28,90	3,900	15,27	4,145	17,14
3	13.07	60	19,20	5,859	33,64	5,560	30,91
4	13.07	63	23,10	1,891	3,570	1,661	2,750
5	13.07	31	26,58	1,582	2,491	1,821	3,312
6	13.07	64	27,17	2,175	4,708	2,415	5,808
Сумма за 13.07	$\Sigma=124,96$		$\Sigma=59,67$				
Среднее за 13.07	25,0						
7	12.07	54	23,14	1,623	2,628		
1	2	3	4	5	6	7	8
8	12.07	55	21,55	3,214	10,301		
9	12.07	56	31,15	6,393	40,831		
10	12.07	57	28,18	3,421	11,69		
11	12.07	58	20,27	4,490	20,16		
Сумма за 12.07	$\Sigma=124,29$		$\Sigma=85,59$				
Среднее за 12.07	24,85						
Сумма за все дни	272,36		148,23				$\Sigma=148,$ 23
Среднее за все дни	24,76						

Анализ данных табл. 6 показывает, что для радона, необходимое количество замеров при доверительной вероятности $P=0,95$ составило 2 измерения.

По приведенной выше схеме измерения радона и его дочерних продуктов распада были проведены в околоствольном дворе (рабочее место стволового, камера ожидания руддвора гор.180 м), на верхних посадочных площадках и нижних посадочных площадках наклонных квершлаггов (воздухоподающих и вентиляционных) на горизонт 750 м, в общешахтных и участковых конвейерных и откаточных выработках. Обобщенные значения по минимальному количеству измерений РФ на рабочем месте в угольной шахте с помощью радиометра РГА-09МШ приведены в табл. 7.

Таблица 6 – Количество измерений n на рабочем месте рукоятчика, необходимое для оценки среднего уровня активности радона

Дата, количество замеров	Коэффициент вариации, v	Доверительная вероятность, P	Коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$	Расчетное количество измерений, n_p	Принятое количество измерений, n
13.07 N=5	0,154	0,95	2,776	1,052	2
		0,9	2,1318	0,620	1
		0,8			1
12.07 N=5	0,186	0,95	2,776	1,540	2
		0,9	2,1318	0,905	1
		0,8			1
17.07 13.07 12.07 N=11	0,258	0,95	2,2281	1,940	2
		0,9	1,8125	1,270	2
		0,8	1,3720	0,73	1

Таблица 7 – Обобщенные значения по минимальному количеству измерений РФ на рабочем месте в угольной шахте с помощью радиометра РГА-09МШ

Контролируемый радиационный фактор (РФ)	Единица измерения	Минимальное количество измерений, n , шт.		
		Доверительная вероятность, P , отн.ед.		
		0,95	0,9	0,8
ЭРОА радона	Бк/м ³	2	2	1
ЭРОА торона	Бк/м ³	3	2	1
ОА радона	Бк/м ³	2	2	1

Как видно из табл. 7, для получения достоверных результатов измерения РФ (определяющих радиационную обстановку в контролируемом рабочем месте) достаточно произвести от одного до трех измерений.

В практике горного дела достоверность результатов измерений параметров имеющих дискретный характер устанавливается достаточным числом измерений. Расчет необходимого числа измерений производится с помощью величины гарантии результатов измерений, принимаемой в пределах от 0,7 до 0,9. Для параметров, имеющих непрерывный характер, расчет необходимого числа измерений производится по величине достоверности, принимаемой в пределах от 0,8 до 0,9 [7]. Измерение РФ с доверительной вероятностью 0,8 приемлемо при проведении исследований РО в угольных шахтах.

Выводы

1. Проведенные исследования позволили установить, что для определения радиационных факторов (ЭРОА радона, ЭРОА торона, активности радона) с учетом дисперсного состава пыли в атмосфере угольной шахты на рабочем месте, где запыленность не превышает 15 мг/м^3 , для доверительной вероятности 0,95, необходимо произвести не менее трех измерений активности контролируемого РФ с помощью радиометра РГА 09МШ.

Для доверительной вероятности 0,9 и 0,8 необходимо соответственно произвести не менее двух и одного измерения активности контролируемого РФ с помощью радиометра РГА 09МШ.

2. При выполнении предварительных измерений радиационных факторов (ЭРОА радона, ЭРОА торона, активности радона) достаточно производить одно измерение (для доверительной вероятности $P=0,8$) и два измерения для доверительной вероятности $P=0,9$.

Список литературы:

1. Ионизирующее излучение: источники и биологические эффекты. Доклад НКДР за 1982 г ООН.– Нью-Йорк, 1982, т.1.– 881 с.

2. Радиометр эквивалентной равновесной объемной активности радона РГА-09МШ (РГА-09МШ1). Руководство по эксплуатации. АЖАХ.412123.008 РЭ. – Желтые Воды: Тетра, 2014. – 27с.

3. МУ 2.6.1.11-01 Организация радиационного контроля на урановых рудниках и расчет доз облучения персонала [Электронный ресурс]: Методическое обеспечение радиационного контроля на предприятии.- Министерство РФ по атомной энергии; Министерство здравоохранения РФ; Федеральное управление медико-биологических и экстремальных проблем.- Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. - М.: Том 4, 2004.- Режим доступа к документу: <http://www.opengost.ru//2878-mu-2.6.1.11-01-organizaciya-radiacionnogo-kontrolya->.

4. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум) : Учебн. пособие/Бородюк В.П., Волошин А.П., Иванов А.З. и др.; Под редакцией Г.К. Круга.- М.: Высш. школа, 1983. - 216 с.

5. ГОСТ 27451-87 Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия (СТ СЭВ 4666-84, СТ СЭВ 6061-87). – М.: Государственный Комитет по стандартам. - 1989.

6. ГОСТ 28271-89 Приборы радиометрические и дозиметрические носимые. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартиформ. – 2004.

7. Типовая программа и методика приемочных испытаний опытных образцов (опытных партий) изделий шахтной автоматики. – РД 12.48.26-79.– Гипроуглеавтоматизация. – 1979.– 41 с.